

ANÁLISIS DE VIBRACIONES EN EL DISEÑO DE PRODUCTOS CON SISTEMAS ROTATIVOS

* L. Vergara, M. Vergara, S. Provenzano
Escuela de Diseño Industrial*
Escuela de Ingeniería Mecánica
Universidad de los Andes
Mérida, Venezuela
Tlf: ++58-274-2401111
lvergara@ula.ve

RESUMEN

En este artículo se presenta el desarrollo y las ventajas para el diseño, de un programa capaz de modelar y simular el comportamiento dinámico de sistemas rotativos, mediante la interacción con un programa comercial de elementos finitos. El modelado y simulación le permiten al ingeniero o diseñador evaluar componentes tales como velocidades críticas, resonancias, amortiguamiento, modos de vibración y desbalances de masa; los cuales juegan un rol importante tanto en el diseño, como en la producción, la operación y el mantenimiento de productos cuyo componente crítico es un rotor. El estudio de estas características normalmente requieren tiempo y experticia considerable de un analista dedicado con el tiempo necesario, sin embargo, con este programa se logra que ingenieros y diseñadores que no dominan el campo de la rotordinámica, ni el de los elementos finitos puedan, usarlo para saber cuales propuestas son adecuadas y cuales pueden rechazar desde el comienzo de desarrollo de un producto compuesto por un sistema rotativo. En este sentido se mostrarán las diferentes características del mismo, resaltando lo importante y significativo de la aplicación de herramientas CAE en las etapas iniciales del desarrollo del producto para: conocer su comportamiento, evaluar el mérito de diferentes ideas, acortar el ciclo de desarrollo del producto, la innovación y obtener ventaja competitiva en el mercado.

Palabras Clave: Rotordinámica, vibraciones, diseño, desarrollo de producto, innovación.

ABSTRACT

In this article is presented the development and the design advantages, of a program able to model and simulate the dynamic behavior of rotating systems, by means of the interaction with a commercial program of finite elements. The modeling and simulation let to engineers or designers to evaluate components as critical speeds, resonances, damping, mode shape and mass unbalance; which play an important issue in the design, like in the production, the operation and the maintenance of products whose critical component is a rotor. The study of these characteristics usually requires considerable time and expertise of a dedicated analyst, however with this program is achieved that engineers and designers who don't dominate the field of the rotordynamic neither the finite elements can use it to know which proposal will be adequate and which can reject from the beginning of the product development. In this sense the different characteristics of the program will be shown, standing out the important and significant of the

application of CAE tools in the initial stages of the development of the product, to know the behavior, to evaluate the merit of different ideas, to shorten the cycle of development of the product, to the innovation and to obtain competitive advantage in the market.

Key Words: Rotordynamic, vibrations, design, product development, innovation.

1 INTRODUCCIÓN

El objetivo principal de las empresas de manufactura es mantener los beneficios y la competitividad, lo que se traduce en ganar y trabajar para el negocio. Este objetivo se ha estado logrando con diferentes técnicas y filosofías que se han afinando a través de los años, sin embargo, el enfoque actual es hacia la creación de productos innovadores que se desarrollen rápidamente, con lo cual se gana un amplio segmento en el mercado (Roth, 2002).

Entre las formas de desarrollar rápidamente los productos está el uso de herramientas CAE, al inicio de la cadena de desarrollo para hacer análisis moderados, los cuales permiten predecir el comportamiento y determinar con precisión cuales propuestas se deben rechazar, cuales se pueden corregir o cuales son adecuadas, evitando cuellos de botella, retornos en la cadena de diseño y reduciendo la creación de prototipos físicos (ANSYS, 2003).

Sin embargo, existe una limitada comprensión tecnológica en los ingenieros y diseñadores al usar estas herramientas en cualquier campo (ya sean estudios estructurales, fluidos, transferencia de calor, electrónica, o vibraciones), aún cuando estas herramientas vienen cada vez más interactivas sólo un grupo muy selecto domina cosas esenciales.

Dada la importancia del análisis y las debilidades en la comprensión, y por consiguiente uso de las herramientas CAE, en este artículo se presentará un programa desarrollado en MATLAB el cual modela sistemas rotativos de forma simple para luego interactuar con ANSYS, simulando y determinando las características dinámicas de los rotores: frecuencias naturales, modos de vibración, velocidades críticas y respuesta armónica del sistema (Vergara, 2003).

Este programa puede utilizarse en las etapas iniciales del desarrollo de un producto cuyo componente principal sea un rotor para evaluar diferentes ideas, filtrar debilidades de diseño antes de un análisis más detallado y permitir más tiempo y energía para consagrar a las partes del proceso de desarrollo del producto que requieran originalidad, creatividad e imaginación.

2 INNOVACIÓN Y DESARROLLO RÁPIDO DEL PRODUCTO

Los principales objetivos de las empresas son mantenerse en el mercado, con alta demanda, atraer cada vez más clientes, tener un buen negocio y rentabilidad. Para lograr esto los fabricantes en casi todas las industrias se han enfrentado tradicionalmente con la misma presión para reducir tiempo y costo mientras mejoran la calidad de funcionamiento del producto. Han trabajado en el máximo de la eficiencia con filosofías de JIT, TQM, SPC y CIM (Roth, 2002). Sin embargo, la directriz es reconocer que esto sólo no garantiza el triunfo en el mercado. Las iniciativas pasadas que apuntan solamente al costo del producto y calidad, no son suficientes para ganar ventaja en el mercado altamente competitivo de hoy. El enfoque ahora es sobre la innovación: productos que claramente se diferencian ellos mismos de otros, mientras son desarrollados en un tiempo corto, son económicos, confiables y rápidos para comercializar (ANSYS, 2003).

La innovación, el llegar primero al mercado, la reducción de desperdicios, el costo y la rentabilidad están altamente relacionados con estrategias de desarrollo del producto en un tiempo corto. El desarrollar el producto rápidamente es importante porque con esto se llega primero a los consumidores, se pueden aprovechar nuevas características para integrarlas a los productos antes que la competencia, se puede analizar el mercado y volver a desarrollar, mientras los demás pueden apenas estar comenzando. El poner tarde el producto en circulación tiene correlación directa con pérdida de la participación en el mercado. Esta tendencia es especialmente fuerte en los últimos años con las preferencias de los consumidores cambiando rápidamente. El acortamiento del desarrollo del producto se ha convertido, no solo en materia de acortar el tiempo para ahorrar dinero, sino en encontrar mayores vías para comprimir el ciclo de desarrollo del producto para supervivencia de la compañía. En la actualidad se ha trabajado con varias estrategias como involucrar la comunidad entera del desarrollo del producto al inicio del esfuerzo de diseño. No solo diseño e ingeniería, sino producción, calidad, mercadeo y ventas.

Más allá de la compresión del tiempo en el desarrollo del producto, un beneficio de alcance más lejano es una disminución del riesgo de falla del producto en el mercado permitiendo que todos los miembros de la cadena de diseño participen en el desarrollo del producto al comienzo del ciclo. Asimismo se está trabajando con herramientas que se usan en conjunto para acortar el tiempo de desarrollo del producto como son las herramientas CAD/CAE/CAM, sin embargo se ha concluido que para que aporten significativamente a la reducción del tiempo de desarrollo del producto no deberían implementarse a un lado ni al final del proceso de desarrollo del mismo, sino que debe ir mezclado con el proceso y desde el principio en la etapa de concepto de producto, para verificar el diseño y guiar la configuración del producto.

3 PROBLEMA DE LAS HERRAMIENTAS CAE

De todas las herramientas usadas en el proceso de desarrollo del producto, el análisis con elementos finitos (FEA) es uno de los más valorados en: análisis de estructuras para detectar áreas que pueden sufrir esfuerzo excesivo; deformación; vibración; u otros problemas potenciales. Apareció desde 1960 y se ha convertido en uno de los métodos más ampliamente usados para estudiar la integridad estructural (NASA, 1968).

FEA tiene ahora capacidades gráficas poderosas, funcionabilidad automática, e interfaces avanzadas al usuario que hacen la tecnología más rápida y fácil de usar comparadas con los primeros programas. Sin embargo se reconoce que los diseñadores y los ingenieros no dominan estas herramientas aunque cada vez son más interactivas hay cosas esenciales que solo un selecto grupo posee. Estas herramientas aún requieren de tiempo y experiencia considerable de un analista dedicado con el tiempo necesario para aplicar densidades de malla apropiadas, tipos de elementos, y condiciones de borde (Vergara, 2003).

Estos analistas expertos también deben conocer como llevar la geometría que van a trasladar a un formato apropiado para la construcción del modelo en FEA como también interpretar correctamente los resultados y otras salidas de información.

Dado las destrezas, entrenamiento, y antecedentes requeridos, casi no hay analistas experimentados en FEA y los pocos encontrados están en grupos centralizados que hacen tareas de análisis a toda la organización. Tradicionalmente, los ingenieros y diseñadores desarrollan parte de la configuración y entonces remiten sus diseños a los analistas, quienes asignan una prioridad al proyecto y trabajan en el cuando pueden, después de que otro trabajo ha sido completado. Pueden pasar días, semanas, o hasta meses antes de que los analistas estén

preparados para entregar los resultados y recomendaciones.

En la mayoría de las compañías este intercambio de información es tan lento y engorroso que FEA es reservado normalmente para componentes críticos con un riesgo identificado. Para otros componentes esto es aplicado en la fase final del desarrollo del producto, frecuentemente solo si el elemento ha fallado en algún paso de la prueba. Los diseñadores e ingenieros entonces reconfiguran las partes y las envían de nuevo atrás hacia el ciclo de diseño de nuevo. Frecuentemente los problemas de funcionamiento que son encontrados tarde en el ciclo de desarrollo del producto necesitan ciclos de rediseño repetitivos hasta que es logrado un funcionamiento satisfactorio, con muchas pruebas iterativas.

Este ciclo tradicional de construye-prueba-falla gasta considerable tiempo y esfuerzo para modificar diseños, cambiar dibujos, dar cambios en la documentación de ingeniería y conseguir asignar las aprobaciones. También los diseños pueden ser bastante menos que óptimos debido a arreglos insertados apuradamente por cumplimiento del plazo de entrega a manufactura. En muchos casos las partes son sobrediseñadas, resultando en un tamaño más grande, más peso, y materiales sin mencionar el incremento de la complejidad de manufactura. Perdiéndose el objetivo de la empresa que es tener un buen nivel de ganancia por reducir los costos, así como la ventana de ganancias económicas y de ocupación del mercado.

4 VENCER EL PROBLEMA DEL CAE Y SUS BENEFICIOS

La solución es entonces permitir a los ingenieros y diseñadores manejar herramientas más fáciles que utilicen al CAE para resolver problemas complejos, al inicio de desarrollo del producto. Estas herramientas llamadas “de primer paso” facilitan la innovación de productos permitiendo a los diseñadores y a los ingenieros con una limitada comprensión de tecnología de análisis ejecutar simulaciones moderadas al principio del ciclo de desarrollo para evaluar conceptos, conducir estudios “qué pasaría sí”, y comparar ideas alternativas (ANSYS, 2003).

Al ejecutar sus propios análisis con herramientas de primer paso, los diseñadores e ingenieros tienen más tiempo para dedicar a aspectos creativos del diseño del producto, y ellos tienen más libertad de explorar ideas innovadoras que de otra forma serán dejadas a un lado o pasadas por alto, a favor de configuraciones más conservadoras ya conocidas.

Uno de los mayores beneficios de adelantar análisis es la habilidad de ejecutar simulaciones “¿qué pasa sí?”, las cuales permiten a los ingenieros y diseñadores evaluar enfoques alternativos y explorar opciones al principio del ciclo de diseño para llegar a un diseño superior. A través de este proceso, los ingenieros y diseñadores pueden investigar rápidamente muchas variaciones del diseño y evaluar numerosas ideas que no sería práctico probar en dispositivos, aparatos, equipos o elementos físicos, esto introduce un camino completamente diferente de experimentar que invita a la innovación, debido a que muchas posibilidades de diseño pueden ser exploradas en iteraciones rápidas. El punto importante inicialmente es comparar alternativas y eliminar malas ideas. Después los detalles serán añadidos incrementalmente y evaluados en cada paso, con una evaluación “¿qué pasa sí?” en cascada moviendo el diseño hacia delante en la dirección ganadora.

En este sentido, la aplicación de las capacidades básicas del CAE al inicio del ciclo de desarrollo del producto permite a las compañías evitar cuellos de botella en el proceso y tomar la mejor ventaja de la experticia de los ingenieros, diseñadores, y analistas a través del proceso completo de desarrollo del producto. Este enfoque conduce a menos, pero mejores, prototipos físicos que sirvan para verificar un diseño refinado en más altos niveles de sofisticación, permitiendo que el prototipo este idealmente listo para pasar a la primera prueba resultando en

una reducción de tiempo significativa, ahorro en costos, mejoras de calidad, e innovación del diseño del producto. Además evita volver a etapas de rediseño o tener problemas por devoluciones en la cadena de desarrollo del producto. El porque se debe a que en las etapas prematuras del concepto, se toman las decisiones fundamentales considerando geometría básica, materiales, configuración del sistema, y procesos de manufactura, y un cambio posterior a medida que se avanza en las etapas del proceso de diseño podría incrementar los costos exponencialmente, de manera que hacer cambios durante el diseño detallado es costoso, muy costoso durante la prueba del prototipo, y tremendamente costoso durante la producción. Más aún corregir errores después que el producto es vendido puede ser prohibitivo en términos de devoluciones y costos de garantía, algunas veces causando consecuencias catastróficas para los fabricantes. Esto mueve al CAE adelante en el diseño conceptual, donde los cambios son mucho más fáciles y más económicos de hacer al corregir diseños malos al inicio.

5 ANÁLISIS DE VIBRACIONES EN SISTEMAS ROTATIVOS

Un sistema rotativo, es un ensamble compuesto por un eje rotor hueco o sólido de sección transversal circular constante o no, sobre el cual está montado uno o varios discos como parte integral o por ajuste de apriete y soportado por cojinetes (Nelson and Crandall, 1992) . Aquí los discos son masas de inercia que podrían representar de acuerdo a sus propiedades, características y posición, desde un taladro dental o un ventilador, hasta una turbina de 64 etapas para generación de potencia (Fig.1).

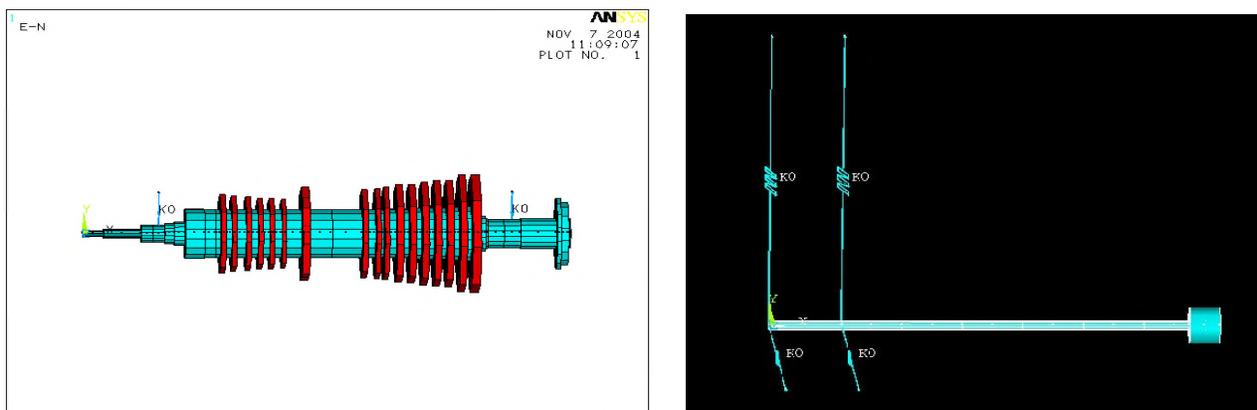


Fig 1 - Modelado de diferentes sistemas rotativos.

La tendencia general en el diseño de estos equipos está en incrementar la potencia de salida a través del uso de rotores flexibles los cuales requieren frecuentemente altas velocidades rotacionales para su operación eficiente. Con las velocidades altas aumenta la posibilidad de que el sistema pueda entrar en resonancia o que sea inestable. Este problema conlleva a perfeccionar el conocimiento de la influencia de las vibraciones características de sistemas rotativos en las operaciones seguras del día a día. Por esta razón, surge la necesidad de comprender la interacción de las fuerzas estáticas y dinámicas resultantes entre los componentes rotativos y los elementos estacionarios como cojinetes, sellos y la carcasa del producto. Al mismo tiempo se ha enfatizado la importancia de predecir con exactitud las velocidades críticas laterales, para conocer bajo que condiciones el sistema resonará en amplitudes grandes e inaceptables. Por otro lado también es

preciso especificar los modos de vibración y conocer a priori las respuestas asociadas a desbalances y amortiguamiento para determinar si el sistema tendrá un comportamiento estable. Estas estimaciones son primordiales para asegurar el funcionamiento a largo plazo del equipo y por ello son esenciales en el análisis de vibraciones en rotores.

Para proveer comprensión y guía durante el desarrollo de un producto o máquina nueva con sistemas rotativos o mejorar el diseño original, se hacen análisis de vibraciones mediante modelos analíticos de manera de poder certificar su operación segura y confiable. (Jørgen y Lund, 2003). Plantear las ecuaciones de movimiento para el análisis de vibraciones requiere de conocimiento en formulación de las variables reales en forma matricial (Han et al., 1995), considerar efectos giroscópicos en la amortiguación, reducir la ecuación matricial a la forma estándar de los autovalores por medio del método de Lanczos (Bai, 1996), para luego utilizar vectores aleatorios que son transformados en una matriz tridiagonal a través de la transformación bi-ortogonal de Lanczos, y luego extraer los autovalores y autovectores del sistema mediante el algoritmo QR. Además es necesario comprender principios de trabajos virtuales, energía potencial y cinética, ecuaciones de Lagrange y teoría de vigas entre otros, para modelar apropiadamente cada componente del sistema (Lalanne, 2001).

La tendencia actual está en el modelado con programas de elementos finitos, sin embargo obtener una solución óptima requiere del manejo de parámetros adicionales que sólo puede definir un especialista de la herramienta para cada sistema rotativo analizado. Además se requiere un analista dedicado con el conocimiento para seleccionar tipos de elementos con las características apropiadas para modelar los componentes, aplicar densidades de malla apropiada, condiciones de borde y aplicar las cargas (Vergara 2003). Si los hay, solo un grupo de personas especializadas son las que van a poder hacer el análisis, pero como ellos ya tienen un trabajo que hacer lo meten en cola y si hay que hacer cambios devuelven propuestas atrás en la cadena de diseño cuando ya se ha perdido bastante tiempo, perdiéndose la ventaja del negocio.

Con el fin disminuir estos problemas y con el propósito de analizar problemas relativos a la respuesta dinámica de sistemas rotativos, partiendo de la definición de las propiedades dinámicas y de los materiales, geometría y cargas, para predecir su comportamiento en servicio, y simplificando el modelado de sistemas rotativos, se crea un programa que sirve como interfaz amigable para modelar y simular el comportamiento de tales rotores. Este interactúa con un paquete computacional de elementos finitos para realizar el análisis de vibraciones en rotores. Para hacerlo, se toma la información del modelo del sistema: eje, disco, cojinete y las condiciones de operación como entrada, y genera como salidas: frecuencias naturales, velocidades críticas, modos de vibración, respuesta armónica y desbalance. La ejecución de este programa permite realizar análisis dinámicos de rotores donde el método utilizado para resolver el problema es transparente al usuario, logrando una interfaz amigable que facilita interactivamente la entrada de datos requerida y la presentación de los gráficos y resultados. Estos resultados muestran que el programa utilizado presenta un mínimo error en las características dinámicas presentadas.

El programa permite ejecutar a través de once módulos las siguientes tareas:

- Manejo de datos requeridos para hacer la composición del modelo, ejecutar un análisis modal o armónico y efectuar la solución.
- Utiliza algoritmos para leer los resultados obtenidos por el programa de elementos finitos (ANSYS).
- A través de procedimientos presenta los resultados.

La interrelación de los módulos que componen el programa y su interacción con el paquete computacional de elementos finitos está dada según el esquema de la Fig.2

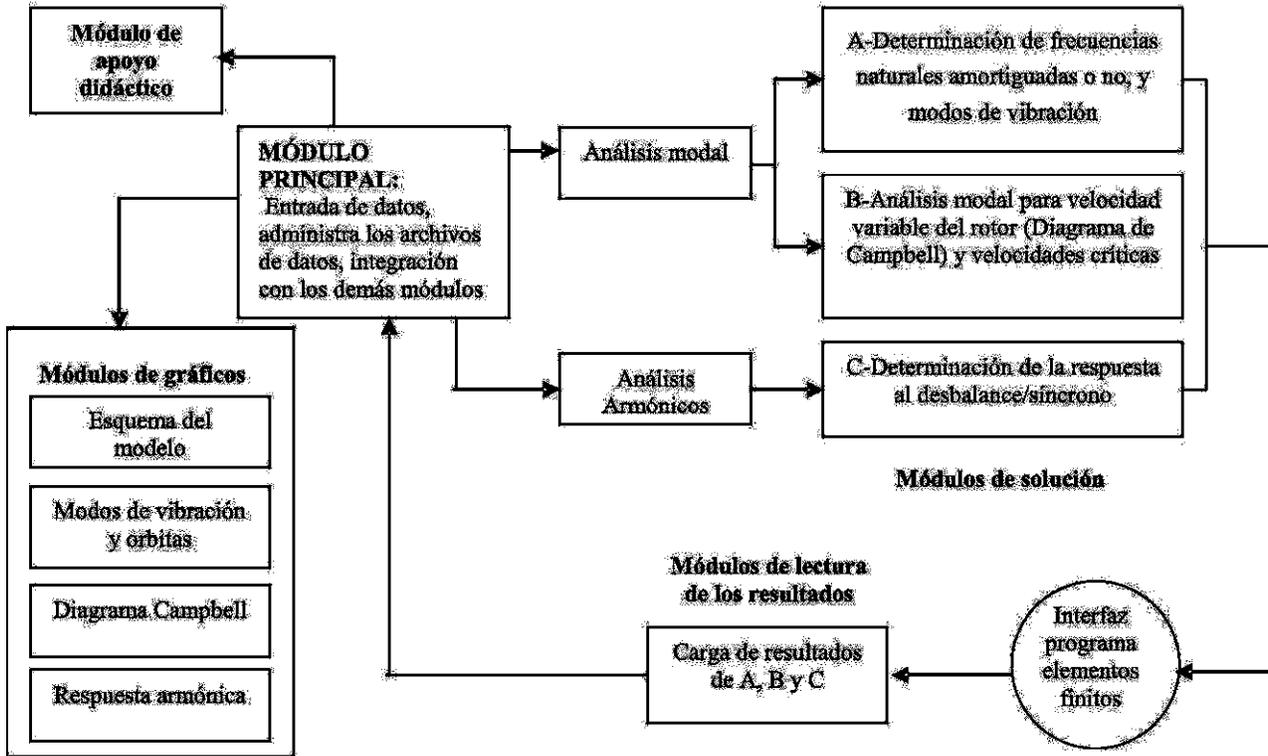


Fig. 2 - Funcionamiento global del programa.

El programa es una interfaz ejecutable que elimina el tiempo de creación del CAD debido a que la entrada de las características del modelo se hace en forma paramétrica. Anteriormente se creaban los modelos en CAD lo cual tomaba tiempo considerable y se perdía más tiempo añadiendo datos perdidos al pasar la geometría CAD a formato de CAE. Si no se utilizaba CAD toda la geometría nodos y elementos se posicionaban manualmente esto tomaba mucho tiempo para el análisis. Con la entrada paramétrica de características y propiedades del eje se pide al usuario: secciones, largo de sección, diámetro externo, interno, modulo de elasticidad, relación de Poisson, con lo cual se crea el mismo de forma automática. Otra desventaja existente es que los usuarios aún debían aplicar lentos y relativamente engorrosos métodos cuando aplican condiciones de contorno y cargas, corriendo las rutinas de postprocesamiento para mostrar los resultados.

Para modelar componentes tales como discos, cojinetes, y fuerzas que actúan en el modelo se hace de manera similar que para el eje. Con esto se pueden hacer análisis de frecuencias naturales, encontrar modos de vibración, velocidades críticas, respuesta al desbalance o a fuerzas fijas en el espacio. Todo esto sin conocer: cuales son las ecuaciones de movimiento, la formulación más apropiada, formulación de principios físicos y mecánicos, como se utiliza el programa de elementos finitos, cuales son los elementos más adecuados, ni cuales son las restricciones o condiciones de frontera.

La interfaz ejecutable está hecha con un programa manejador de matrices (MATLAB) el cual envía información del modelo al ANSYS que corre todos los análisis y retorna los resultados ya sea con valores o gráficos a la interfaz de manera transparente al usuario.

La meta al usar este software es que los usuarios puedan estudiar, cuantificar, y graficar varias simulaciones de la respuesta de funcionamiento en función de cambios en los parámetros de diseño para las partes del ensamble. Con lo rápido que es el estudio se ahorra tiempo en llegar a un óptimo diseño. Adicionalmente, la interactividad dinámica del proceso provee a los usuarios con una visión más grande del problema y sirve como un catalizador para explorar nuevas ideas.

Un resumen de los errores en los resultados obtenidos puede observarse en la Fig.3.

Máximos errores

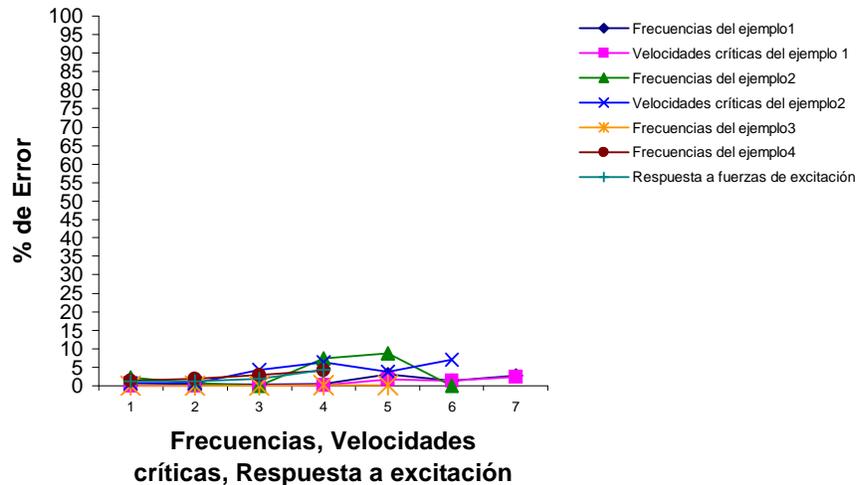


Fig.3 - Resumen de los errores relativos en los diferentes ejemplos.

El gráfico muestra que el programa desarrollado da resultados con una exactitud bastante buena. Así pues, su error está delimitado en el peor de los casos por magnitudes menores del 9 %, mientras que, para la mayoría de los resultados examinados está por debajo del 5%.

Los resultados dan una luz de cómo funcionará el componente aún en las etapas iniciales del proceso de desarrollo del producto y permite preguntarse, por ejemplo, que pasaría si se reduce el diámetro del eje, si se cambia la densidad del material o geometría del disco, si se cambian las propiedades o se varía la posición de los cojinetes, con lo cual además se puede ver si trabajaría bajo condiciones aceptables o si debe ser rechazado desde el principio.

La optimización del diseño basado en la simulación puede ser usada en rutinas automáticas, tareas repetitivas en la evaluación de la influencia de muchas variables diferentes, permitiéndole al ingeniero más tiempo y energía para consagrar a las partes del proceso de desarrollo del producto que requieran la originalidad, creatividad e inspiración.

En la etapa inicial del concepto, los ingenieros usan un sistema básico para proporcionar una revisión al concepto propuesto de diseño, para determinar si la idea tiene mérito. En este punto el modelo CAE puede ser sólo una aproximación preliminar y la parte geométrica no muy detallada. Una vez que el concepto básico parece llevadero, una etapa de definición y desarrollo sigue, en la cual un diseñador añade detalles. En este proceso, una evaluación de “¿qué pasa si?” secuencial sirve para probar características adicionales antes de que ellas se incluyan al diseño. En este

sentido el sistema guía al diseñador para asegurar que el camino correcto está siendo seguido en el desarrollo del modelo.

Después de que todos los detalles son añadidos, el diseño maduro es pasado a un analista dedicado para una profunda y rigurosa evaluación de CAE. Las debilidades del diseño que pueden causar un rediseño mayor en un diseño de producto tradicional ya han sido filtradas.

6 ¿QUÉ BENEFICIOS TRAE USAR EL SOFTWARE EN LAS ETAPAS INICIALES DEL DISEÑO?

Desde la perspectiva de los ingenieros y diseñadores, la nueva herramienta a su disposición les permitirá obtener resultados más rápidamente que lo que fuera posible anteriormente. Ellos pueden señalar problemas con precisión adelantándose suficientemente para corregirlos fácilmente, y ganar una gran comprensión del comportamiento de la parte y la actuación del producto. El resultado final es que ellos evitan la agonía y el caos de último minuto, y todas las sesiones nocturnas para resolver problemas justo antes de que el producto sea mandado a manufactura.

Ejecutar sus propios análisis con herramientas de primer paso, los diseñadores e ingenieros tienen más tiempo para dedicar a aspectos creativos del diseño del producto, y ellos tienen más libertad de explorar ideas innovadoras que de otra forma será dejadas a un lado o eludidas a favor de configuraciones más conservadoras (ANSYS, 2003).

Esto reduce más la probabilidad de que un nuevo producto sea extraño a lo que el consumidor quiere, necesita o esta deseoso por pagar por un producto. Algunos observadores de la industria estiman que de 35% a 50% de los productos nuevos lanzados pierden su mercado objetivo.

El otro extremo llevaría a: problemas con la seguridad del usuario, devoluciones, gastos de garantías, reprocesamientos, hacer arreglos rápidos de última hora para que el equipo funcione antes de pasar a manufactura hará que el producto sea bastante sobrediseñado, en espesores o volúmenes, y que tal vez dañe el diseño total del producto. También podría conducir a productos no confiables porque no evaluamos diferentes condiciones o escenarios.

Por otro lado sí se deja para el final de ciclo de desarrollo del producto, solo un grupo de personas especializadas son las que van a poder hacer el análisis, pero como ellos ya tiene un trabajo que hacer, lo ponen en cola y si hay que hacer cambios se devuelve atrás cuando ya se ha perdido bastante tiempo y se pierde la ventaja del negocio. Y se pondrá el producto en circulación tarde lo cual tiene correlación directa con pérdida de la participación en el mercado.

7 CONCLUSIONES

El análisis de vibraciones en sistemas rotativos es algo realmente complejo que pasa a ser una tarea fácilmente realizable usando FEA como procesador matemático y una interfaz amigable que reduce la tarea de CAD, mallado, selección de elementos apropiados, y condiciones de frontera, proporcionando respuesta más interactivas y de más contenido que el CAE por si solo.

Este tipo de herramienta de análisis de vibraciones es un ejemplo que se puede reproducir en otros tipos de análisis, en donde el CAE pasa de ser un mundo oscuro que solo se deja a los especialistas para ser componente esencial de la estrategia global del negocio cuando es fácilmente operable por los diseñadores e ingenieros aún los de mayores limitaciones. Estas herramientas deben usarse desde las fases iniciales del desarrollo del producto para seleccionar las mejores propuestas y filtrar para que el prototipo llegue sin detalles al final del proceso de desarrollo.

El valor más grande de la simulación para las compañías de manufactura está en facilitar la innovación. Los altos ejecutivos saben que la innovación en el desarrollo del producto así como en los procesos de manufactura, es la clave para que la compañía tenga un potencial de largo plazo en el mercado. El estar enfocados en el consumidor, con diseños innovadores y que lleguen rápido al mercado se está convirtiendo en un factor determinante de si una compañía prospera, sobrevive o muere.

En los mercados de manufactura competitivos de hoy, las compañías que quieren estar en el negocio deben conocer sus consumidores, desarrollar las ideas a través de sólidos principios de ingeniería, y confiar en herramientas basadas en computadoras tales como tecnología de simulación para evaluar y refinar diseños tan rápido y exactamente como sea posible.

Al no usar estas herramientas se va a una competencia que se tiene perdida de antemano. Será un formula uno (F1) contra una tortuga, el F1 llegará al cliente, obtendrá su dinero y retroalimentación y cuando llegue la tortuga al cliente el producto ya será obsoleto

8 BIBLIOGRAFÍA

- [1] ANSYS Inc.; “Leveraging the Design Chain”, ANSYS, 2002.
- [2] ANSYS Inc.; “Leveraging Simulation: The Design Innovation Process”, ANSYS, 2003.
- [3] Bai, Z.; “An adaptive block lanczos method for non-hermitian eigenvalue problems”, Department of Mathematics, University of Kentucky, 1996.
- [4] Gregory R; “Análisis in action: The value of early analysis”, Eaton Corporation Innovation Center, Southfield Michigan, 2002.
- [5] Han, D.C.; S.H. Choi y Y.H. Le; “Analysis of vibration characteristics for a rotor-bearing system using distributed spring and damper model”, Int. J. of Rotating Machinery, Vol. 1, No.3-4, 277-284, 1995.
- [6] Jørgen, T. y J.W. Lund; “Theories versus tests, Part 2: Damped critical speeds of rotors and fluid film bearing characteristics”, Journal of Vibration and Acoustics, October, Vol. 125, 489-494, 2003.
- [7] Lalanne, M. y G. Ferraris; “Rotordynamics prediction in engineering”, John Wiley & Sons, 2001.
- [8] NASA space vehicle design critery; “Natural vibrations: Modal analisis”, National Aeronautics and Space Administration, 1968.
- [9] Nelson H.D. y S.H. Crandall; “Analytic prediction of rotordynamic response”, Handbook of Rotordynamics, 1992.

[10] Vergara L.; “Programa interactivo para el análisis de sistemas rotativos”, Tesis de Maestría, Universidad de los Andes, Mérida, 2003.